

PENANGANAN LONGSORAN BENDAN DENGAN *BORED PILE*

Eric Himawan, Muhrozi^{*)}, Kresno Wikan S.^{*)}

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof Soedarto, SH., Tembalang, Semarang. 50239, Telp.: (024) 7474770, Fax.: (024) 7460060

ABSTRAK

Daerah Bendan yang terletak pada Jalan Pawiyatan Luhur, Semarang, Jawa Tengah, mengalami longsor yang mengganggu aktivitas di daerah tersebut, terutama karena ada dua universitas yang terletak pada jalan tersebut. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengatasi longsor tersebut adalah dengan membangun *bored pile* pada lokasi longsor. Untuk merancang *bored pile*, harus diketahui terlebih dahulu stabilitas lereng yang ada dengan berbagai cara. Yang paling sederhana ialah memodelkan longsor menjadi suatu bidang datar yang terbagi dalam banyak pias dengan gaya dalam masing-masing, lalu dicari faktor keamanan kumulatifnya menggunakan metode Fellenius. Bila keadaan longsor tersebut telah diketahui, dapat direncanakan penanganannya menggunakan *bored pile* atau *drilled shaft*. Metode elemen terhingga yang memperhitungkan efek *soil arching* dapat digunakan untuk memperkirakan beban yang akan ditanggung oleh *bored pile*, demikian juga dengan metode Broms. Sebagai analisis pembandingan, dapat digunakan program komputer Plaxis 8.6 untuk mendapatkan hasil terkomputerisasi. Setelah penanganan dengan *bored pile*, lereng yang dalam keadaan kritis akan mengalami kenaikan faktor keamanan hingga senilai 1,436.

Kata kunci: Analisis Stabilitas Longsor, Penanganan Longsor, *Bored Pile*

ABSTRACT

The Bendan region, located on Pawiyatan Luhur Street, Semarang, Central Java, experienced a landslide, disrupting the activity on the said region, mainly because there are two universities located on the said street. One of the means that could be devised to remediate the landslide is to build bored piles on the site. To design the bored piles, the stability of the existing slope should be examined. One of the most simple is making a two-dimensional finite element model of the landslide, dividing it into many wedges with each of their own internal forces, and figuring out its cumulative safety factor using the Fellenius method. Once the condition of the landslide is known, remediation could be undertaken using bored piles or drilled shafts. An analysis of soil arching effect, factored into finite element method, may be used to estimate the loads which are to be sustained by the bored piles, so does the Broms method. As a comparative analysis, Plaxis 8.6 calculation programme could be utilized to provide a computerized result. After remediation using the bored piles has been undertaken, the slope in its critical state will receive a raise in safety factor value up to 1.436.

Keywords: Analysis of Landslide Stability, Remediation of Landslide, Bored Piles

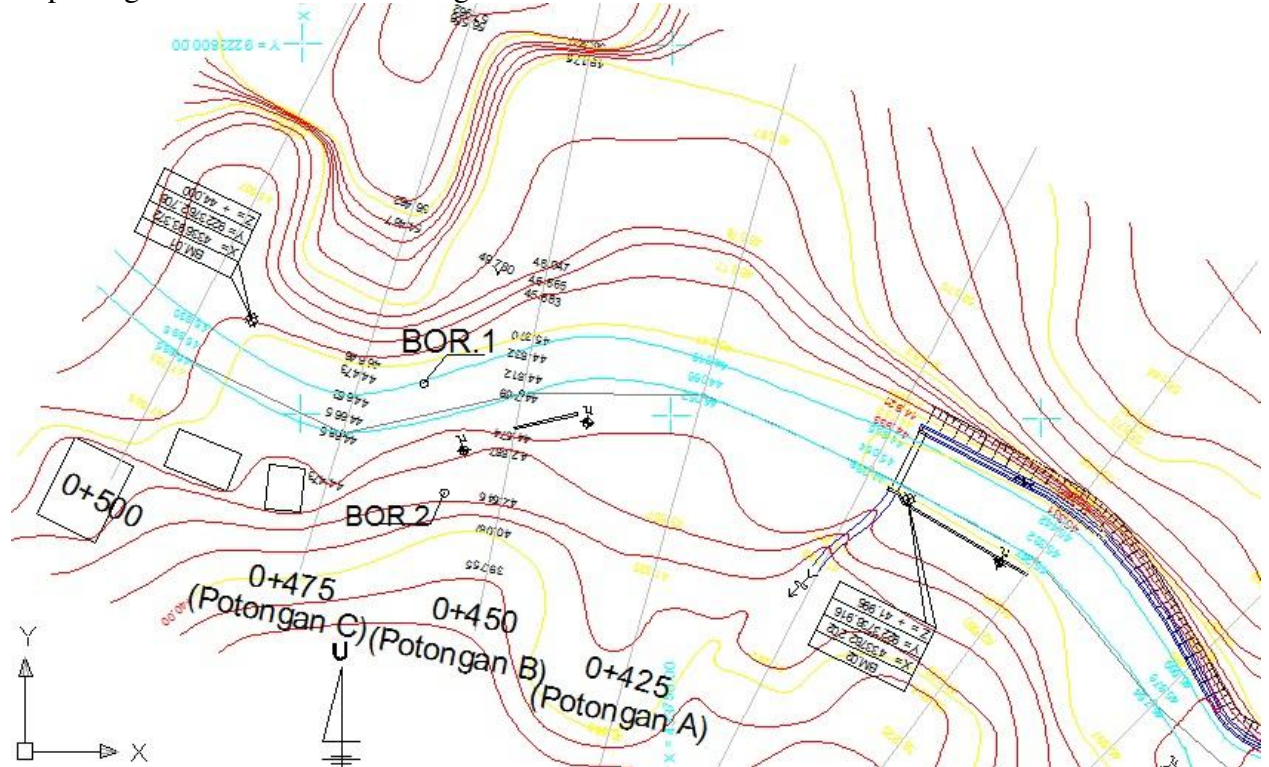
PENDAHULUAN

Kota Semarang, Jawa Tengah terdiri dari dua bagian, yaitu dataran rendah dan dataran tinggi.

^{*)}Penulis Penanggung Jawab

Akibat dari bentuk kontur tersebut adalah adanya lereng-lereng curam yang biasanya terdapat pada bagian selatan kawasan Kota Semarang.

Namun, urbanisasi dan perluasan daerah kota menuntut adanya permukiman dan pusat kegiatan di daerah lereng tersebut, yang menyebabkan terjadinya longsor pada Jalan Pawiyatan Luhur Semarang yang terletak di dekat kampus Universitas Tujuh Belas Agustus Semarang, seperti dapat dilihat pada Gambar 1. Atas dasar permasalahan itulah, dilakukan analisis longsor dan teknik penanganan untuk menahan longsor tersebut.



Gambar 1. Peta Kontur Lokasi Longsor

Tinjauan Pustaka

Stabilitas Longsor

Stabilitas sebuah longsor dapat diselidiki dari faktor keamanannya, yaitu perbandingan antara gaya yang menahan massa tanah pada lereng dibandingkan dengan gaya yang akan menggerakkannya (Cornforth, 2005). Untuk mendapatkan nilai faktor keamanan, dapat dilakukan pemodelan longsor menjadi bidang dua dimensi yang terbagi menjadi banyak pias yang kesetimbangannya masing-masing dijaga oleh gaya dalam pada tiap pias. Cara ini disebut metode Fellenius, dan faktor keamanan dihitung secara kumulatif dari faktor keamanan masing-masing pias. Faktor keamanan dapat juga dihitung dengan memodelkan longsor secara digital pada program Plaxis 8.6.

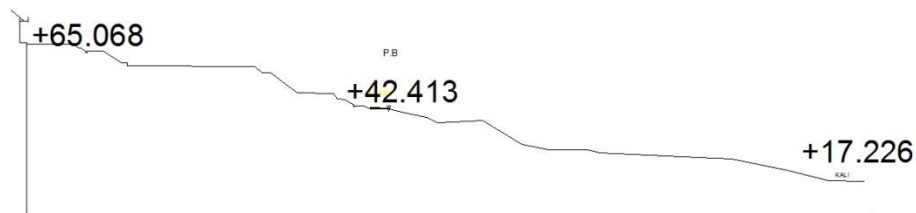
Teknik Penanganan

Beberapa teknik penangan dapat ditempuh, misalnya dengan *bored pile*, pelandaian lereng, dll, namun yang akan digunakan adalah *bored pile*. *Bored pile* adalah pondasi dalam yang dicor di tempat, yang dibangun dalam sebuah lubang yang telah distabilisasi supaya peletakan tulangan baja dan cor beton dapat terkontrol. Diameternya yang besar memberikan tahanan yang baik terhadap penggeseran dan penggulingan (US Department of Transportation, 2010). Pada suatu barisan *bored pile* yang ditanamkan ke dalam tanah sampai pada kedalaman tanah keras, dapat

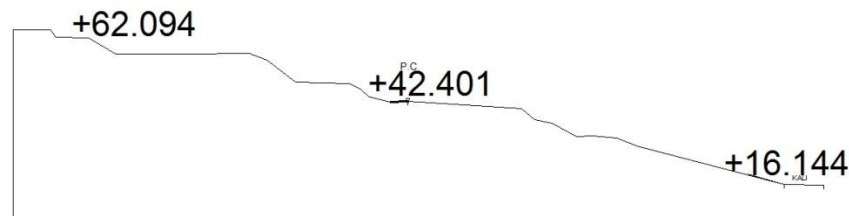
terbentuk *soil arching effect*, yaitu perpindahan tegangan dari tanah di depan (*upslope*) barisan *bored pile* menuju tanah di belakang (*downslope*) *bored pile*, karena tanah berusaha bergerak melalui sela-sela antar *bored pile* yang kaku (Liang dan Zeng, 2002). Perencanaan *bored pile* sebaiknya memperhitungkan *soil arching effect* untuk desain yang optimal.

METODOLOGI ANALISIS

Analisis dilakukan pada longsor di daerah Bendan, STA 0+450 (selanjutnya disebut potongan B) dan STA 0+475 (selanjutnya disebut potongan C) jalan Pawiyatan Luhur, Semarang. Penampang melintang Potongan B dan Potongan C dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Penampang Melintang Lokasi Longsor pada STA. 0+450 (Potongan B)



Gambar 3. Penampang Melintang Lokasi Longsor pada STA 0+475 (Potongan C)

Data yang tersedia adalah data sekunder, didapatkan dari hasil pengujian oleh Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Diponegoro. Pengujian yang dilakukan adalah uji SPT dan pemeriksaan pergerakan lateral tanah dengan *inclinometer*. Analisis dapat dibagi menjadi tahap-tahap di bawah ini:

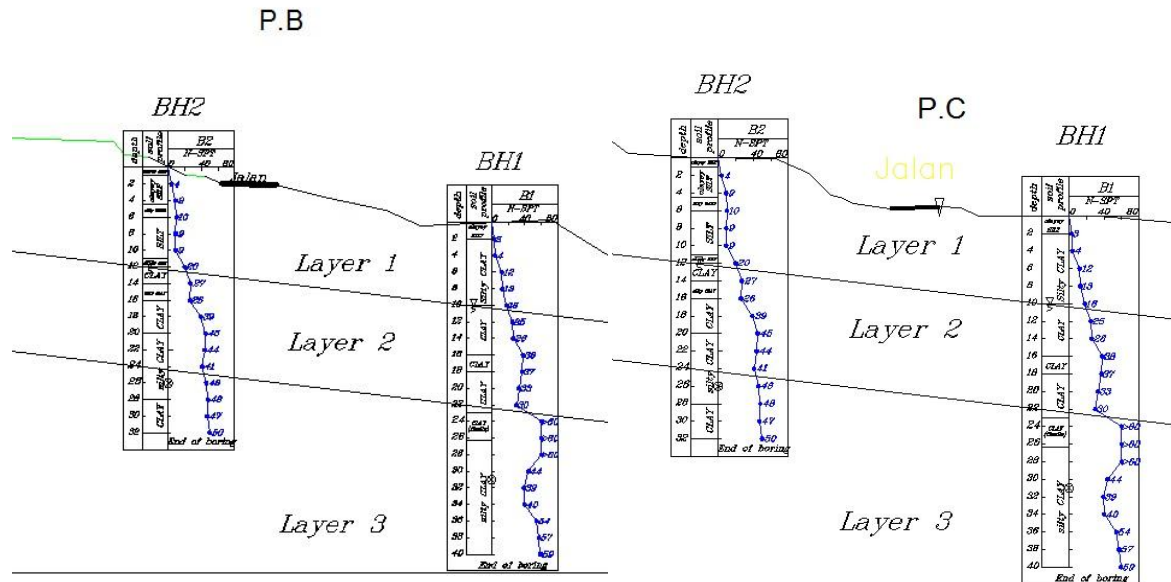
Analisis Tanah

Secara topografis, dari hasil pemantauan melalui Google Earth dan membandingkan citra satelit dari tahun 2002-2012, daerah longsor tidak banyak berubah. Secara geologis, bila dilihat dari Peta Geologi Indonesia Bagian Semarang-Magelang (Thanden dkk, 1996), daerah longsor yang ditinjau berada di antara formasi Damar (Qtd) dan formasi Kalibeng (TmPk). Formasi Damar terdiri dari batupasir tufan, konglomerat, breksi vulkanik (kemungkinan pengendapan lahar), sebagian non-marin. Formasi Kalibeng terdiri atas napal pejal di bagian atas, setempat berkarbon, fosil yang ada dari zaman miosen akhir sampai pleiosen. Secara pedologis, bila dilihat dari Peta Jenis Tanah UNESCO, tanah pada lokasi longsor termasuk jenis *Ferric Luvisol*, yaitu jenis tanah yang terdapat pada dataran tinggi dengan tingkat kelandaian sedang, dan setidaknya pada kedalaman 100 cm dari permukaan tanah mengandung *ferric horizon* (lapisan tanah yang mengandung ion besi) Tanah jenis ini mengandung banyak lempung aktivitas tinggi, berbahaya untuk pekerjaan teknik sipil (FAO, 2001).

Uji SPT

Pengeboran dilakukan pada dua titik, adapun denah pengeboran dapat dilihat pada Gambar 1. Uji SPT dilakukan setiap 2 m, dengan kedalaman bor 40 m pada BH1 dan 32 m pada BH2.

Dari hasil uji SPT, didapatkan *bore log* yang dapat disuperposisikan kepada gambar penampang melintang potongan longsoran PB dan PC. Untuk keperluan analisis longsor, penampang tersebut dibagi menjadi lapisan-lapisan tanah dengan karakteristik kuat geser tanah yang berbeda-beda. Lapisan ditentukan dengan melihat serta menghubungkan permukaan air tanah serta deskripsi lapisan tanah pada masing-masing *bore log*, kemudian ditarik garis sebagai pembatas antara lapisan-lapisan seperti dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. (a) Pembagian Lapisan Tanah pada Potongan B dan (b) Pembagian Lapisan Tanah pada Potongan C

Berhubung jenis tanah pada longsor tersebut adalah lempung, kuat geser tanah pada parameter total menggunakan nilai $\phi = 0$ dan nilai $c_u = 4$ kali nilai N-SPT (Look, 2007). Nilai c_u di setiap layer pada masing-masing potongan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Perkiraan *Shear Strength* pada Tiap Lapisan dari Nilai N-SPT pada *Bore Hole 1*

layer	type	N-SPT	Average N-SPT	ϕ (degree)	Cohesion c_u (kPa)	description
Layer 1	c-soil	3;4;12;13;18	10	-	40	Firm
Layer 2	c-soil	25;26;38;37;33;30	31.5	-	126	Very Stiff
Layer 3	c-soil	60;60;60;44;39;40;54;57;59	52.556	-	210.222	Hard

Tabel 2. Perkiraan *Shear strength* pada Tiap Lapisan dari Nilai N-SPT pada *Bore Hole 2*

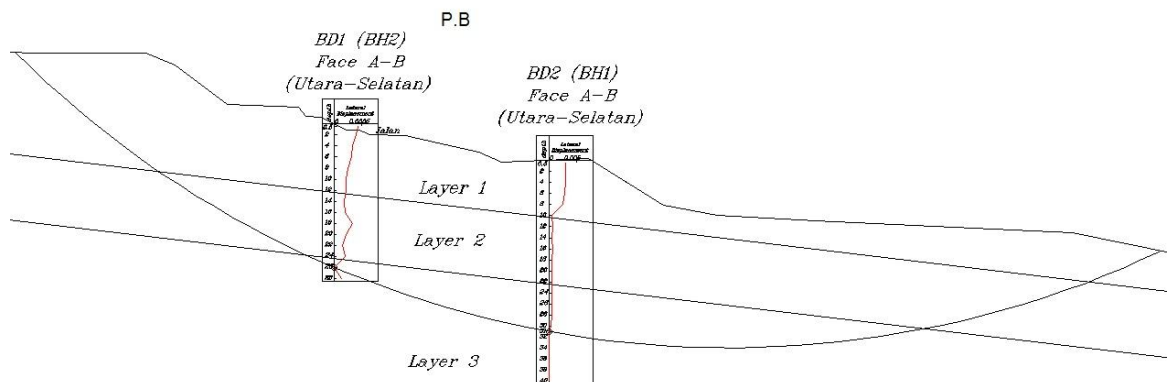
layer	type	N-SPT	Average N-SPT	ϕ (degree)	Cohesion c_u (kPa)	description
Layer 1	c-soil	4;9;10;9;9;20	10.167	-	40.667	Firm
Layer 2	c-soil	27;26;39;45;44;41	37	-	148	Very Stiff
Layer 3	c-soil	46;48;47;50	47.75	-	191	Very Stiff

Tabel 3. Parameter Tanah berdasarkan N-SPT Kondisi *Existing*

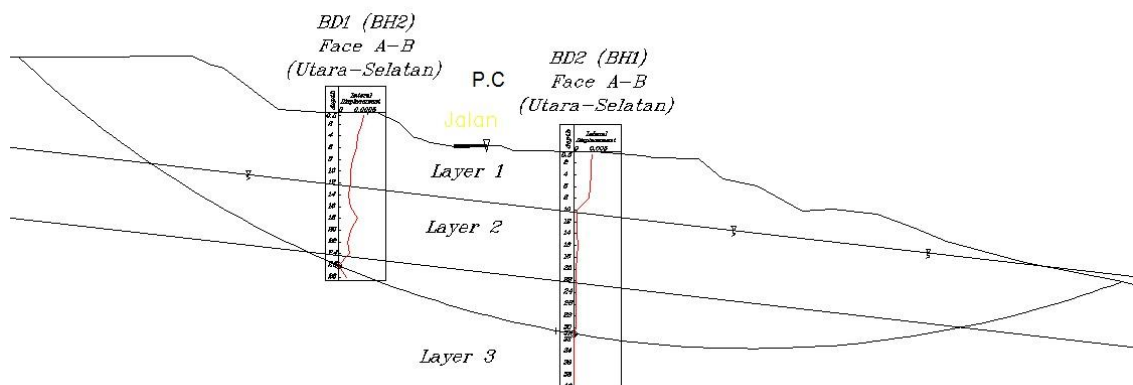
Layer	Model material	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c_u (kN/m ²)	ϕ degree	description	E_{ref} (kN/m ²)	ν
Layer 1	nonporous	16	18	40	-	Firm	9200	0.3
Layer 2	nonporous	16	18	126	-	Very stiff	27800	0.3
Layer 3	nonporous	16	18	191	-	Very stiff	47300	0.3

Pemeriksaan Gerakan Lateral Tanah

Pergerakan lateral tanah pada daerah longsor diperkirakan menggunakan *inclinometer*. Hasil bacaan *inclinometer* disuperposisikan pada posisi *borehole* potongan B dan C. Bidang gelincir diperkirakan dari data *inclinometer* menjadi seperti pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Bidang Gelincir pada Potongan B



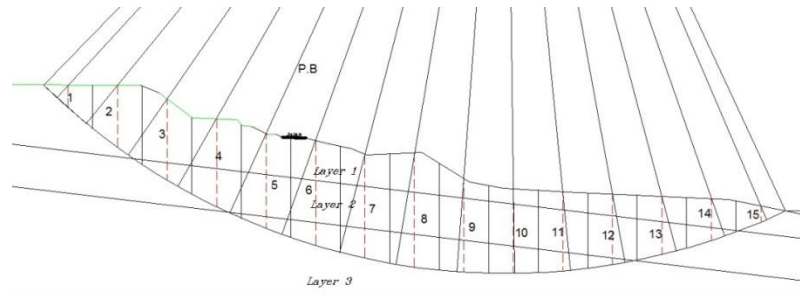
Gambar 6. Bidang Gelincir pada Potongan C

Perhitungan Stabilitas Lereng

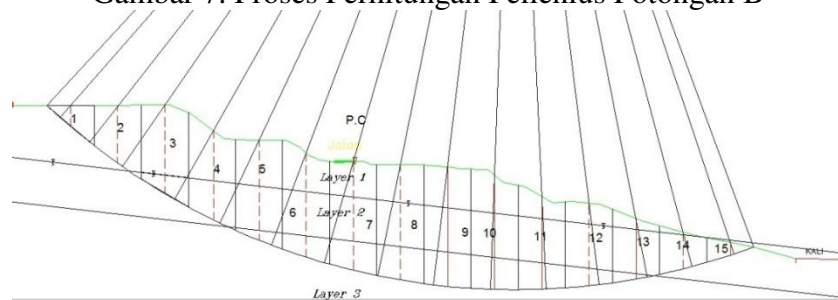
Berdasarkan data yang ada, dilakukan perhitungan untuk mengetahui Faktor Keamanan stabilitas lereng yang ditinjau. Perhitungan dilakukan secara manual dan dengan bantuan program komputer. Perhitungan secara manual dilakukan dengan metode Fellenius, sedangkan perhitungan dengan komputer dilakukan dengan program Plaxis 8.6. Luasan longsor adalah sebesar 18750 m², sedangkan berdasarkan penggolongan ukuran longsor menurut Cornforth (2005) dapat dikatakan bahwa longsor tergolong ukuran sedang dan membutuhkan minimal 2 titik *boring*, dengan target peningkatan Faktor Keamanan (F) minimal 1,40.

a. Perhitungan secara Manual

Analisis menggunakan metode Fellenius, dimana bidang gelincir dibagi menjadi 15 pias dengan lebar yang sama, dengan lebar searah tegak lurus bidang gambar sebesar 1 meter. Adapun lebar pias pada potongan B sebesar 14,139 meter, dan lebar pias pada Potongan C sebesar 12,77 meter. Kemudian ditarik sebuah garis titik berat pada tiap-tiap pias. Lalu, dari titik pusat lingkaran pembentuk bidang gelincir ditarik sebuah garis yang berpotongan dengan ujung atas garis berat tiap pias yang ada, menghasilkan sudut α . Sudut yang terbentuk searah jarum jam bernilai positif, sedangkan sudut yang terbentuk berlawanan arah jarum jam bernilai negatif (Craig dan Knappett, 2012). Ilustrasi dari proses ini dapat dilihat masing-masing pada Gambar 7 untuk Potongan B dan Gambar 8 untuk Potongan C.



Gambar 7. Proses Perhitungan Fellenius Potongan B



Gambar 8. Proses Perhitungan Fellenius Potongan C

Untuk perhitungan stabilitas lereng jangka pendek, digunakan nilai C_u yang sudah didapatkan dari perhitungan sebelumnya, dan nilai Φ sama dengan 0. Berat jenis tanah diambil nilai 16 kN/m³ untuk nilai *unsaturated* dan 18 kN/m³ untuk nilai *saturated*. Bila hasil perhitungan memberikan nilai faktor keamanan lebih dari 1, hasil tersebut tidak mencerminkan keadaan tanah yang sebenarnya, yang terpengaruh oleh faktor-faktor eksternal. Oleh sebab itu, dengan proses *trial and error* dicari konfigurasi kuat sudut geser tanah jangka panjang yang akan menghasilkan faktor keamanan (F) = 1. Dengan nilai $c = 0$, nilai ϕ' yang berkorespondensi dapat dicari.

b. Perhitungan dengan Plaxis 8.6

Untuk menggambarkan keadaan tanah pada saat lereng hampir mengalami kegagalan (faktor keamanan sama dengan 1), digambarkan pula bidang geser atau *discrete shear zone* pada bidang longsoran, seperti yang diperkirakan menggunakan *inclinometer*. Nilai kohesi masing-masing layer mulai dari yang teratas adalah 40, 60, dan 191 kN/m², dengan $\Phi=1^\circ$. Nilai kohesi untuk bidang geser longsoran dicoba-coba sehingga menghasilkan nilai faktor keamanan sama dengan 1. Pemodelan kemudian dianalisis untuk mendapatkan perkiraan bidang gelincir dan faktor keamanan dari masing-masing potongan.

Desain Bored Pile

Bored pile direncanakan dengan diameter 1,5 m, jarak as tiang 3 m, panjang tiang 65 m, mutu beton (f'_c) 25 MPa, mutu baja (f_y) 400 MPa, penulangan 25x4D32, panjang angkur 55 m dengan *bonded length* 25 m dan diameter 0,2 m, sedangkan *unbonded length* 30 m dengan diameter 0.15 m. Desain dilakukan secara manual dan dengan bantuan Plaxis 8.6.

a. Desain Manual dengan Metode Broms

Pertama, perlu diketahui apakah tiang ini termasuk tiang panjang atau tiang pendek (Prakash dan Sharma). Maka, digunakan perbandingan antara panjang tiang (L) dan faktor kekakuan tiang (R). Nilai modulus elastisitas beton (E_c) dapat dicari dengan cara seperti pada Persamaan 1.

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \sqrt{25} = 23500 \text{ MPa} \quad (1)$$

Nilai momen inersia penampang lingkaran dapat dicari seperti pada Persamaan 2.

$$I = \frac{1}{64} D^4 = \frac{1}{64} 1.5^4 = 0,0791 \text{ m}^4 \quad (2)$$

Nilai k didapatkan dari hasil interpolasi pada Tabel 4.

Tabel 4. Hubungan antara Modulus Reaksi Tanah (k) dengan Nilai Kohesi *Undrained* Tanah (c_u) untuk Tanah *Overconsolidated*

Consistency	Firm to stiff	Stiff to very stiff	Hard
Undrained shear strength (c_u) kN/m ²	50–100	100–200	>200
Range of k , MN/m ³	15–30	30–60	>60

Sumber: Tomlinson dan Woodward, 2008

Didapatkan nilai $k = 16,6071 \text{ M/N}^3$ untuk nilai c_u rata-rata dari 3 lapisan tanah, yaitu 55.357 kPa. Maka, nilai R dapat dihitung seperti pada Persamaan 3.

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{kB}} = \sqrt[4]{\frac{23500 \text{ MPa} \times 0.0791 \text{ m}^4}{16.6071 \text{ M/N}^3 \times 1.5 \text{ meter}}} = 8,638 \quad (3)$$

Dengan panjang tiang 65 meter, nilai perbandingan L/R adalah 7,525, lebih dari 3,5, maka *bored pile* yang direncanakan termasuk tiang panjang.

Dari hasil perhitungan dengan metode Fellenius sebelumnya, diketahui bahwa nilai faktor keamanan (F) untuk potongan B dan C tergolong aman. Karena itu, nilai kohesi masing-masing lapisan tanah akan diturunkan dalam besaran yang sama, sehingga suku $[cL_a]$ akan mengalami penurunan nilai, dan faktor keamanan akan mencapai nilai kritis ($F=1$). Berdasarkan hasil coba-coba, ditemukan bahwa nilai kohesi pada potongan B perlu diturunkan mencapai 39% nilai aslinya (menjadi 15,6 kPa, 49,14 kPa, dan 74,49 kPa secara berurutan dari permukaan tanah), sedangkan nilai kohesi pada potongan C diturunkan mencapai 40% dari nilai aslinya (menjadi 16 kPa, 50,4 kPa, dan 76,4 kPa secara berurutan dari permukaan tanah) untuk mencapai kondisi kritis.

Potongan B dan C dibagi menjadi pias-pias dengan lebar masing-masing 2 meter, dan nilai kohesi yang berkorespondensi dengan lapisan tanah tempat dasar masing-masing pias tersebut berada. Kemudian, pias-pias yang diasumsikan sebagai lokasi pemasangan *bored pile* ditingkatkan nilai kohesinya sehingga nilai F akan naik ke angka yang diinginkan, dalam hal ini, $F = 1.40$.

Hasil perhitungan pada potongan B menunjukkan bahwa nilai kohesi pada pias 34, 35, 71, dan 72 harus ditingkatkan hingga 850 kPa dari nilai awalnya yaitu 74.49 kPa, sehingga nilai suku $c.L$ terbesar menjadi 1810.5 kN/m. Namun, hasil tersebut hanya mencerminkan per 1 m tanah, padahal jarak antara as tiang adalah 3 m. Maka, gaya yang akan ditanggung sebuah tiang adalah senilai $3cL$, yaitu 5431.5 kN.

Sementara, pada potongan C, hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai kohesi pada pias 34, 35, 71, 72 harus ditingkatkan hingga 840 kPa dari nilai awalnya yaitu 76.4 kPa, sehingga nilai suku cL terbesar menjadi 1772.4 kN/m. Adapun gaya lateral yang akan ditanggung satu tiang adalah senilai 3cL yaitu 5317.2 kN. Untuk mengetahui apakah gaya tersebut dapat ditanggung oleh tiang, dilakukan pemeriksaan dengan hitungan Broms. Momen nominal penampang *bored pile* dapat diketahui dengan program analisis kolom FAPCol. Penulangan 25 x 4D32 diekuivalensikan menjadi 25D64. Ditinjau dari diagram P-M hasil analisis, diketahui bahwa momen nominal penampang tersebut (Momen saat gaya aksial sama dengan 0, Mo) adalah 15059.78 kNm. . Persamaan kesetimbangan untuk mencari kedalaman tanah di mana gaya lateral ultimit tiang akan bekerja (f) dapat dinyatakan seperti pada Persamaan 4 (Davis dan Poulos, 1980). Berdasarkan data yang diperoleh, Persamaan 4 diproses menjadi Persamaan 5, yang kemudian dapat disederhanakan menjadi Persamaan 6.

$$f^3 9cuD 1.5D + 0.5f^2 9cuD - 2Mu = 0 \quad (4)$$

$$f^3 9cu \times 1.5 m 1.5 \times 1.5 m + 0.5f^2 9cu \times 1.5 m - 2 \times 15059.78 kNm = 0 \quad (5)$$

$$30.375cu f^3 + 6.75cuf^2 - 30119.56 = 0 \quad (6)$$

Kemudian, nilai gaya lateral ultimit (Hu) yang akan terjadi dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 7, yang dengan input data menjadi Persamaan 8, dan dapat disederhanakan menjadi Persamaan 9.

$$Hu = \frac{2Mu}{(1.5D + 0.5f)} \quad (7)$$

$$Hu = \frac{2 \times 15059.78 kNm}{(1.5 \times 1.5 m + 0.5f)} \quad (8)$$

$$Hu = \frac{30119.56 kNm}{(2.25 + 0.5f)} \quad (9)$$

Dengan memasukkan nilai kohesi *undrained* (cu) = 74.49 kPa untuk potongan B pada Persamaan 6, didapatkan nilai f sebesar 5.8102 meter. Memasukkan nilai f yang telah didapat ke dalam Persamaan 9 memberikan nilai gaya geser ultimit (Hu) sebesar 5842.672 kN. Hasil perhitungan gaya lateral pada tiang (3cL) adalah 5431.5 kN, lebih kecil dari nilai gaya geser ultimit yang diizinkan (Hu), maka konfigurasi tiang tersebut aman untuk potongan B.

Sedangkan, untuk potongan C dengan nilai kohesi *undrained* (cu) = 76,4 kPa, didapatkan nilai f = 5,7167 meter dari Persamaan 6, dengan nilai gaya geser ultimit (Hu) = 5896,204 kN dari Persamaan 9. Hasil perhitungan gaya lateral pada tiang (3cL) adalah 5317,2 kN, lebih kecil dari nilai gaya geser ultimit yang diizinkan (Hu), maka konfigurasi tiang tersebut aman dan dapat digunakan secara umum untuk seluruh lereng.

b. Desain Manual dengan Memperhitungkan *Soil Arching Effect*

Untuk cara ini, data diolah sesuai metode Fellenius yang telah dilakukan. Pembagian pias masih sama seperti sebelumnya, hanya saja dibuat tambahan pias untuk mensimulasikan keberadaan *bored pile* pada lereng. Pada potongan B, pias 5 dibagi menjadi pias 5a, 5b, dan 5c dengan lebar (b) masing-masing 11,944 m, 1,5 m, dan 0,695; sedangkan pias 11 dibagi menjadi pias 11a, 11b, dan 11c dengan lebar (b) masing-masing 0,61 m, 1,5 m, dan 12,029 m. Pada potongan C, pias 6 dibagi menjadi pias 6a, 6b, dan 6c dengan lebar (b) masing-masing 4,65 m, 1,5 m, dan 6,62 m; sedangkan pias 12 dibagi menjadi pias 12a, 12b, dan 12c dengan lebar (b) masing-masing 1,53 m, 1,5 m, dan 9,74 m.

Pada potongan B, ketika nilai F=1, sudut geser kritis senilai 13,331 derajat. Nilai sudut geser ini diinterpolasi sesuai dengan tabel nilai Rp seperti pada Tabel 12, kemudian

didapatkan nilai $R = 64,825\%$. Nilai R ini dipasang pada pias yang terdapat di belakang barisan *pile* (*downslope*).

Dari hasil analisis pada potongan B, diketahui bahwa gaya ultimit maksimal yang akan diterima satu buah tiang (F_{shaft}) adalah 4436,2907 kN, dan faktor keamanan mengalami kenaikan hingga $F=1,7047$. Berdasarkan perhitungan Broms untuk potongan B yang telah dilakukan sebelumnya, diketahui batas maksimal gaya lateral ultimit yang dapat ditahan oleh satu tiang adalah 5842,824 kN, maka konfigurasi tiang ini aman untuk potongan B.

Sedangkan, hasil analisis pada potongan C menunjukkan bahwa gaya ultimit maksimal yang akan diterima satu buah tiang (F_{shaft}) adalah 4301,7919 kN, dan faktor keamanan mengalami kenaikan hingga $F=1,516$. Hasil perhitungan Broms untuk potongan C yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan batas maksimal gaya lateral ultimit yang dapat ditahan oleh satu tiang adalah 5896,204 kN, maka konfigurasi tiang ini aman dan dapat digunakan secara umum untuk seluruh lereng.

c. Desain dengan Plaxis 8.6

Hasil analisis dengan program Plaxis 8.6 menunjukkan, potongan B mengalami kenaikan faktor keamanan menjadi 1,2567, sementara potongan C mengalami kenaikan faktor keamanan menjadi 1,4360. Maka, konfigurasi *bored pile* dapat digunakan untuk mengatasi longsoran.

Desain Angkur

Untuk mengetahui apakah angkur yang direncanakan dapat digunakan, diambil hasil output Plaxis 8.6 untuk bagian angkurnya. Diketahui bahwa angkur pada potongan B memberikan gaya tarik 42,150 kN/m, dan pada potongan C memberikan gaya tarik sebesar 39,050 kN/m. Gaya tarik pada potongan B lebih besar, maka itulah yang akan digunakan.

Kemampuan sebuah angkur untuk menahan gaya tarik dapat dicari dengan Persamaan 10. α adalah koefisien gesekan tanah. Nilai kohesi *undrained* yang digunakan adalah nilai terkecil dari dua potongan yang ditinjau, yaitu 74,49 kN/m² dari potongan B. Grafik membutuhkan nilai tegangan efektif vertikal tanah, yaitu tegangan pada kedalaman jarak titik tengah *bonded length* dari permukaan tanah. Tegangan efektif vertikal dapat dicari seperti pada Persamaan 10, dan dilanjutkan menjadi Persamaan 11.

$$\sigma'_o = 16 h_1 + 18(h_2) + 18(h_3) \quad (10)$$

$$\sigma'_o = 16 \cdot 20,373 + 18(12) + 18(12,4793) \quad (11)$$

Didapatkan nilai $\sigma'_o = 766,5954$ kN/m² dari Persamaan 11, maka nilai c_u/σ'_o adalah $74,49/766,5954$, yaitu 0,097 atau hampir sama dengan 0,01. Hasil tersebut di-plot-kan pada grafik faktor adhesi empiris tanah menurut Murphy dan Randolph (1985). Didapatkan nilai α sebesar 1. maka kapasitas tarik angkur dapat dihitung pada Persamaan 12.

$$T = \pi \cdot 0,2 \cdot 25 \cdot 1 \cdot 74,49 + \frac{\pi}{4} \cdot 0,2^2 \cdot 0,15^2 \cdot 74,49 \cdot 9 \quad (12)$$

Dari Persamaan 12, didapatkan nilai $T = 1179,3$ kN. Sementara, gaya tarik yang dihasilkan dari analisis adalah 42,150 kN/m, kurang dari nilai T , maka angkur tersebut aman dan dapat dipakai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Stabilitas Lereng

Dari hasil perhitungan diketahui bahwa Faktor Keamanan (F) potongan B sebesar 2,567 dan Faktor Keamanan (F) potongan C sebesar 2,502, namun hasil ini tidak mencerminkan keadaan tanah yang sebenarnya, yang terpengaruh oleh faktor-faktor eksternal. Oleh sebab itu, dengan proses *trial and error* dicari konfigurasi kuat sudut geser tanah jangka panjang yang akan

menghasilkan faktor keamanan (F) = 1. Dengan nilai $c = 0$, dihasilkan nilai $\phi' = 14,99$ untuk potongan B dan $\phi' = 16,26$ untuk potongan C.

Sedangkan usaha coba-coba pada Plaxis 8.6 menunjukkan bahwa nilai kohesi pada bidang geser adalah 50 kN/m^2 untuk potongan B dan 60 kN/m^2 untuk potongan C untuk mensimulasikan keadaan kritis, yang akan menghasilkan Faktor Keamanan potongan B senilai $F = 1,0143$ dan Faktor Keamanan potongan C senilai $F = 1,0111$.

Desain Bored Pile

Perhitungan dengan metode Broms menunjukkan gaya yang akan ditanggung sebuah tiang adalah $5431,5 \text{ kN}$ yang bekerja pada kedalaman $5,8102$ meter dari permukaan tanah. Sedangkan perhitungan dengan melibatkan *Soil Arching Effect* memberikan gaya pada satu tiang sebesar $4436,2907 \text{ kN}$. Semua hasil tersebut masih lebih rendah dari gaya lateral ultimit maksimal yang diizinkan, yaitu $5842,824 \text{ kN}$, sehingga desain *bored pile* dapat disimpulkan aman.

Hasil analisis dengan program Plaxis 8.6 menunjukkan, potongan B mengalami kenaikan faktor keamanan menjadi $1,2567$, sementara potongan C mengalami kenaikan faktor keamanan menjadi $1,4360$. Maka, konfigurasi *bored pile* dapat digunakan untuk mengatasi longsoran.

3. Desain Angkur

Dari Persamaan 12, didapatkan nilai $T = 1179,3 \text{ kN}$. Sementara, gaya tarik yang dihasilkan dari analisis adalah $42,150 \text{ kN/m}$, kurang dari nilai T , maka angkur tersebut aman dan dapat dipakai.

KESIMPULAN

Dari analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Jenis tanah pada lokasi longsoran adalah tanah luvisol *marine shale* yang mengandung banyak mineral *montmorillonite*. Tanah jenis ini memiliki kapasitas kembang susut yang tinggi, membuatnya berbahaya untuk pekerjaan teknik.
2. Bidang gelincir longsoran pada lokasi berbentuk sirkular dengan kedalaman 31 meter. Dalam jangka panjang, lereng akan mengalami keadaan kritis ($F=1$) bila sudut geser tanah (ϕ) mencapai nilai $16,26^\circ$.
3. Untuk mengatasi longsor, digunakan konfigurasi *bored pile* dengan diameter $1,5 \text{ m}$, jarak as tiang 3 m , panjang tiang 65 m , mutu beton (f'_c) 25 MPa , mutu baja (f_y) 400 MPa , penulangan $25 \times 4D32$, panjang angkur 55 m dengan *bonded length* 25 m dan diameter $0,2 \text{ m}$, sedangkan *unbonded length* 30 m dengan diameter $0,15 \text{ m}$. di mana terdapat dua baris *pile cap* yang akan menahan longsoran, dan tiap *pile cap* terdiri atas dua baris *bored pile*. Kenaikan faktor keamanan setelah *bored pile* ditanamkan adalah $1,2567$ pada Potongan B dan $1,4360$ pada potongan C.

SARAN

Setelah pengerjaan penanganan longsoran selesai, ada baiknya untuk tetap meninggalkan *inclinometer* di dalam lereng, untuk memantau kecepatan dan arah pergerakan lereng. Bila kecepatan mendekati 0 , lereng berhasil diatasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Thanden, R.E., Sumadirja, H., Richards, P.W., Sutsina, K., Amin, T.C., 1996. *Peta Geologi Lembar Magelang dan Semarang, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Jakarta.
- Cornforth, Derek H., 2005. *Landslide in Practice*. New Jersey: John Wiley and Sons.
- Craig, R.F. dan Knappet, J.A., 2012. *Craig's Soil Mechanics*. Oxfordshire: Spon Press.
- Davis, E.H. dan Poulos, H.G., 1980. *Pile Foundation Analysis and Design*. Sidney: University of Sydney.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001. *Lecture Notes on the Major Soils of the World*. Roma.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1976. *Soil Map of the World Edition I/1976, Southeast Asia, Sheet IX*. Paris: United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization.
- Liang, Robert dan Zeng, Sanping, 2002. Stability Analysis of Drilled Shaft Reinforced Slope. *Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society*, **42**(2) 93-102.
- Look, Burt G., 2007. *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis Group.
- Murphy, B.S. dan Randolph, M.F., 1985. Shaft Capacity of Driven Piles in Clay. *Proceedings, Oxford Technology Conference*, **1** 371-378.
- Prakash, Shamsheer dan Sharma, Hari D., 1990. *Pile Foundations in Engineering Practice*. New York: John Wiley & Sons.
- Tomlinson, Michael dan Woodward, John, 2008. *Pile Design and Construction Practice*. Oxfordshire: Taylor and Francis.
- U.S. Department of Transportation, 2010. *Drilled Shafts, Construction Procedures and LRFD Design Methods*. Washington: National Highway Institute.